

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.02.034

超级电容电气参数辨识中激励信号与数据预处理问题分析

赵 洋

(东莞理工学院电子工程与智能化学学院, 广东 东莞 523808)

摘要: 准确辨识超级电容电气性能参数是评价其使用性能的重要依据,因此在辨识实验设计和辨识数据的分析处理方面要深入分析并采用合适的方法,以此来提高参数辨识的精度。分别对辨识实验中涉及的激励信号的选择、实验数据长度和采样周期的确定、实验数据的滤波处理等问题进行讨论,并给出具体的解决方案。通过实验和仿真结果对比发现,基于文中的参数辨识实验设计方法,对原始实验数据经小波滤波预处理后可以获得更为精确的参数辨识结果,为实现超级电容电气参数的准确辨识提供了理论指导和依据。

关键词: 超级电容; 电气参数; 辨识; 逆M序列; 小波分析

Issue Analysis of Stimulus and Data Pre-processing for Supercapacitor Electrical Parameters Identification

ZHAO Yang

(College of Electrical Engineering and Intelligentization, Dongguan University of Technology, Guangdong Dongguan 523808, China)

Abstract: In order to estimate the performance of supercapacitor, it is important to identify correctly its electrical parameters. Therefore, firstly, the design of identification experiment and data processing which will influence the accuracy of identification should be analyzed in depth. In this paper, the selection of stimulus signal, the definition of the length of experimental data and sampling period, and the data filtering method are particularly discussed, and concrete solutions are presented. The comparison of experimental and simulation results show that, based on the identification experiment designing process and wavelet filtering method, we can acquire more precise identification results of supercapacitor electrical parameters. This paper provides the theoretical direction and the basis for the realization of accurate identification of supercapacitor's electrical parameters.

Key words: supercapacitor; electrical parameter; identification; inverse M sequence; wavelet analysis

0 引言

随着以太阳能和风能等为代表的清洁能源发电技术的广泛应用,储能系统成为克服此类能源的波动性和不连续性等特点的一项重要的支撑技术^[1-4]。在此背景下,锂离子电池、燃料电池和超级电容等^[5-8]储能器件受到相关研究人员的广泛重视。其中,超级电容因具有功率密度大、工作温度范围宽和循环寿命长等优点^[9-13],在构建大规模储能系统方面具有突出的技术优势。

在实际应用中,为保证储能系统整体的安全性和可靠性,需要对超级电容单体进行监控和管理,以便及时获知其电气性能的具体表现。为满足该使用要求,需要对超级电容的电气特征参数进行准确辨识^[14]。在保证参数辨识的精度方面,除了选择合适的辨识算法之外^[15],还需要综合考虑其他影响因素,主要包括:辨识信号的选择、采样周期的确定和原始数据的预处理等。针对参数辨识算法问题,笔者在文[16]中已进行过深入分析。因此,文中着重针对以上其他影响因素进行详细讨论,从而为准确辨识超级电容电气参数提供理论支持和技术指导。

收稿日期:2017-09-21; 修回日期:2017-11-04

基金项目:国家自然科学基金项目(51407031)资助;国家重点研发计划(2017YFB0903205)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51407031); National Key Research and Derelopment Program (2017YFB0903205).

1 激励信号与数据预处理的影响和作用

为了使系统是可辨识的,系统的输入信号必须满足一定的条件。一个最低的要求是,在辨识时间内系统的所有模态必须被输入信号持续激励。更进一步的要求是输入信号的选择应能使给定问题的辨识模型精度最高^[17]。

针对超级电容电气参数的辨识问题,可以把待测对象即超级电容看作是单输入单输出(single input single output, SISO)系统。对于此类系统,可辨识的充分必要条件是其激励信号必须满足 $2n$ (n 为系统的阶次)阶持续激励条件。此外,实时采集得到的原始输入、输出数据,通常都含高频噪声成分,这对于辨识也有负面影响。因此,为了提高辨识的精度,必须对原始数据进行预处理。

2 激励信号与数据预处理的分析内容

2.1 激励信号类型的具体选择

由前述可知,对于SISO系统,可辨识的充分必要条件是其激励信号满足 $2n$ 持续激励。白噪声是最常见的持续激励信号,它能用作激励任何待辨识系统的输入信号。但在实际应用中难以生成真正意义上的白噪声,因此常用其他信号进行替代。其中,循环周期充分大的M序列和逆M序列也是持续激励信号,且它们的生成在工程应用中比较容易实现,因此可作为实际辨识实验的输入信号类型。

2.2 实验数据长度的选择

从理论上讲,辨识所用的实验数据长度 N 越长,观测噪声对辨识结果的影响越小,即数据长度足够长可以保证最小二乘辨识算法的渐进一致性,辨识结果的精度就越高^[17]。但是 N 过大会增加计算量,加重硬件实现的负担和成本。因此需根据实际需要折中选择原始数据的长度。

2.3 采样周期选择

采样周期的合理选择,要综合考虑以下两方面的要求。

首先要考虑频谱的混迭问题。由香农采样定理可知,如果采样周期 T 选得过大,即采样点离得太远,就会引起低频分量与高频分量的混迭,使辨识结果精度降低。此外 T 选得太大,也会把被辨识系统中一些有用的高频分量丢失。由于系统高频部分特性反映不出来,因此辨识得到的数学模型也不准确。

其次要考虑辨识算法的执行效率和工作量。

如果采样周期 T 选得过小,即采样点离得太近,将使得辨识算法实现时用到的差分方程变得接近于线性相关,这样容易形成病态方程组,无法获得辨识结果。此外,当系统的噪声干扰较大时, T 取得很小,还会将噪声的特性反映到被辨识模型中去,造成辨识结果的失真。同时,不能忽视的一点是,如果 T 取得过小,意味着相同时间内采集到的数据越多,还有可能产生大量的多余数据,从而不必要地增加系统存储量、计算量和实现成本。

2.4 数据滤波处理

在现场所采集的原始数据中,往往由于各种原因(如传感器输出电路振荡、传输通道中的外界干扰等)而包含有高频噪声成分。从而破坏辨识算法所要求的输入和输出信号具有平稳性的假设。因此,为了提高参数辨识结果的精度,应当设法尽量消除观测数据中的高频噪声。要保留有用信号,必须去除信号中叠加的噪声和干扰成分,如果噪声的频率高于或低于有效信号,则采用滤波方法去除噪声,也可以通过使信号平滑的方法抑制干扰带来的毛刺。滤波方法是一种频域处理方法,在分析信号的频率特性时,信号变化率小的部分对应低频分量,变化率大的部分则对应高频分量。用滤波的方法滤除其高频部分就能去掉高频噪声,保留真实的有用信号。

经典的数据滤波方法主要是基于频域的处理方法,以滤波器的形式去噪。它是通过将有用信号和噪声信号在频域进行分离的方法实现去噪。但这种方法要在信号频谱和噪声频谱没有重叠的前提下,才能把信号和噪声完全分离开来。而实际情况中信号频谱和噪声频谱往往是重叠的,因为无论是白噪声还是脉冲干扰,他们的频谱几乎都是分布在整个频域范围内的。如果要得到比较好的噪声平滑效果,就必然会引起信号的模糊和轮廓不清,如若使信号的轮廓清晰,就必然难以获得理想的噪声平滑效果。在使用时必须加以权衡,在二者之间做出合理的选择。

3 激励信号与数据预处理的具体分析

3.1 采样频率计算

采用频率的选择可以参考经验式(1)进行计算^[17],该式利用待测对象的主要时间常数 T_a 来确定最终的采样周期。

$$T=(0.005\sim 0.1)T_a \quad (1)$$

文中实验对象为等效串联内阻 $0.5\text{ m}\Omega$ 、等效电

容 80 000 F 的超级电容,因此可直接得到其主要时间常数 $T_a = R \cdot C = 0.000\ 5 \times 80\ 000 = 40\ s$ 。将其代入到式(1)中可得采用周期的取值范围为 $T = (0.2 \sim 4)\ s$ 。综合算法执行效率和频谱混迭要求,选取 1 s 作为文中实验作用的采样周期。

3.2 实验数据长度的选择

文[17]指出,一般实验数据长度应该为被辨识系统的主要时间常数的 10 倍。即

$$NT \geq 10T_a \quad (2)$$

针对文中的研究对象,根据计算可知,数据长度应该保证在 400 s 以上。

3.3 激励信号选择

M 序列是一种比较理想的辨识输入信号。但是谱分析表明,M 序列含有直流成分,这将造成对辨识对象的“净扰动”。而逆 M 序列可以克服这一缺点,它是一种比 M 序列更为理想的伪随机码序列,因此文中选择逆 M 序列作为超级电容电气参数辨识实验的输入信号形式。

M 序列可以由线性反馈移位寄存器来产生。逆 M 序列可直接在 M 序列的基础上产生,且工程上容易实现^[18]。文中采用将 M 序列和方波序列在每位上进行模 2 和运算来产生逆 M 序列。生成后的逆 M 序列波形,如低电平用 0 表示,高电平用 1 表示,则可表示为 01011 01110 01111 10100 10001 10000。其波形见图 1。

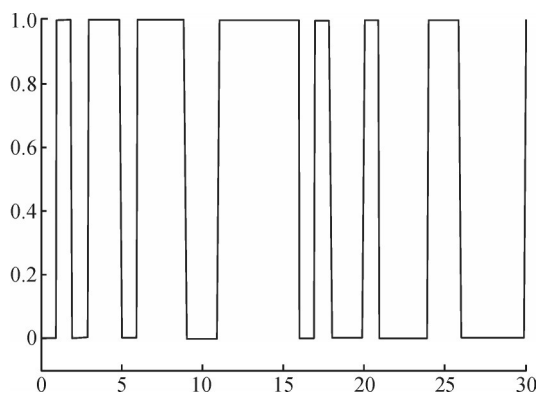


图1 逆M序列波形图

Fig. 1 Waveform of inverse M sequence

采用逆 M 序列信号作为超级电容充电电流信号的实验波形见图 2。其中,实验时间长度 3 000 s,满足前述分析中对实验数据长度的要求。

具体实验过程为:以双向 DC/DC 分别连接测试电源和待测超级电容。结合图 1 的波形,设定 DC/DC 的通断时间间隔。在实验过程中通过 NI 同步数据采集卡实时同步采集(根据前述分析内容,文中实验采样周期选择为 1 s)超级电容端电压和充电电流

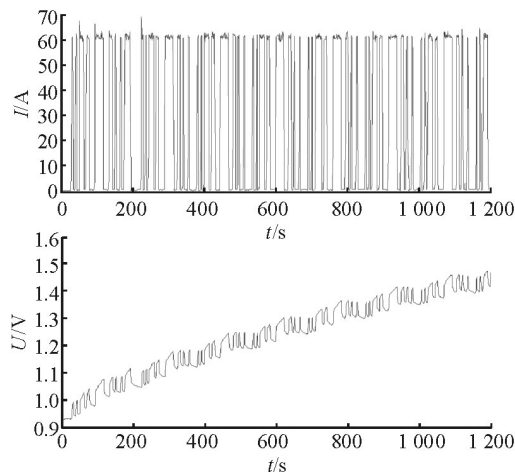


图2 逆M序列充电实验波形

Fig. 2 Experiment waveforms of inverse M sequence current charging

信号(图 2 中上部和下部子图分别为实时采集得到的充电电流和超级电容端电压信号)。由实测的电流信号可以看出,为保证 DC/DC 输出满足逆 M 序列的快速性要求,采用数字 PID 控制会造成其输出信号的超调过大,反映在图形中即电流的上升沿有较大的尖峰,该信号对于辨识超级电容参数不利,因此采用滤波的方法加以平滑电流信号的上升沿。

3.4 数据滤波

3.4.1 小波分析的基本概念

传统的信号分析是建立在傅里叶分析之上,但傅里叶分析只是一种纯频域的分析方法,信号完全是在频域展开的,不包含任何时域的信息。但其丢弃的时域信息可能对某些应用非常重要,所以在傅里叶分析的基础上进行了推广,提出了很多能表征时域和频域信息的信号分析方法,如短时傅里叶变换和小波变换等。

小波分析具有多分辨分析的特点,在时域和频域都有表征信号局部信息的能力,时间窗和频率窗都可以根据信号的具体形态动态调整,在一般情况下,在低频部分(信号较平稳)可以采用较低的时间分辨率,而提高频率的分辨率,在高频情况下(频率变化不大)可以用较低的频率分辨率来换取精确的时间定位^[19]。因此,小波分析可以探测正常信号中的瞬态成分。

3.4.2 小波分解与重构

根据多分辨分析理论, $L^2(R)$ 中的函数 $f(t)$ 可表示成一系列近似函数的逼近,其中每一近似函数都是 f 在不同分辨率子空间上的投影,通过这些投影来研究和分析 f 在不同子空间上的性态和特征。其分解结构见图 3。

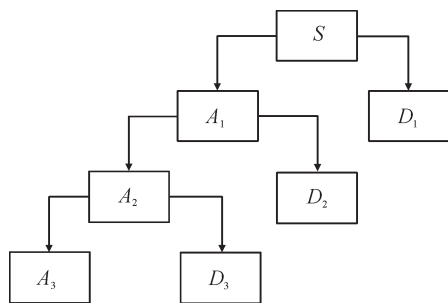


图3 小波分解结构图

Fig. 3 Decomposition structure of wavelet

可以使用滤波器来完成小波分解,其原理见图4。

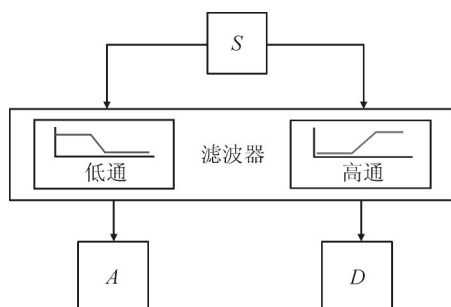


图4 小波分解原理图

Fig. 4 Schematic of wavelet decomposition

图4中: S 表示原始的输入信号,通过两个互补的滤波器产生 A 和 D 两个信号; A 表示信号的近似值; D 表示信号的细节值。

信号重构是信号分解的逆过程,它把经过分解的系数还原成原始信号。

3.4.3 小波滤波原理

基于小波分解与重构的原理,可以通过以下3个步骤实现小波滤波^[20]:

1)选择一个波类型,并确定一个小波分解层次 m ,然后对信号进行 m 层小波分解。

2)对小波分解得到的高频系数的阈值进行量化。即从第1层到第 m 层的每一层高频系数选择一个阈值进行阈值量化处理。

3)根据小波分解的第 m 层的低频系数和经过量化处理后的第1层到第 m 层的高频系数,对信号进行重构。

针对文中实验内容,具体滤波方法为:在MATLAB小波工具箱中,选用db1小波,进行单尺度(即 $m=1$)分解,然后对高频噪声进行硬阈值强制降噪。

4 实验验证

为定量分析经小波分析滤波处理后的数据对

辨识精度的影响,首先针对同一组实验数据分别进行滤波和不做滤波处理,然后应用两组数据分别辨识出超级电容的电气参数,最后根据仿真结果的误差指标进行对比分析。

1)未经滤波处理的实验效果分析。直接利用图2所示的原始数据进行参数辨识,然后对该辨识结果进行仿真得到实测数据与仿真数据的对比见图5。

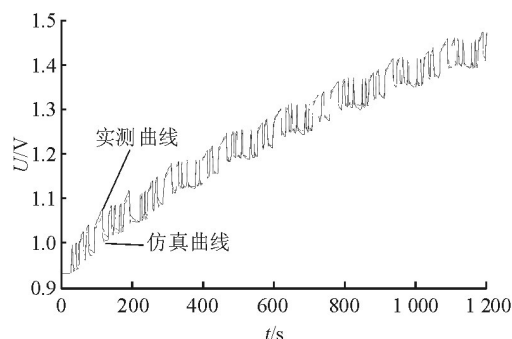


图5 仿真端电压曲线与实测端电压曲线对比

Fig. 5 Comparison of real and simulation terminal voltage

2)小波滤波后实验效果分析。对图2所示的原始数据进行小波滤波处理。经过小波滤波处理后的信号波形图见图6。对比图2可以看出,经小波滤波处理后的数据比原始数据变得更加平滑,充电电流信号的尖峰已经滤除。利用滤波处理后的数据再次进行参数辨识,然后对该辨识结果进行仿真。

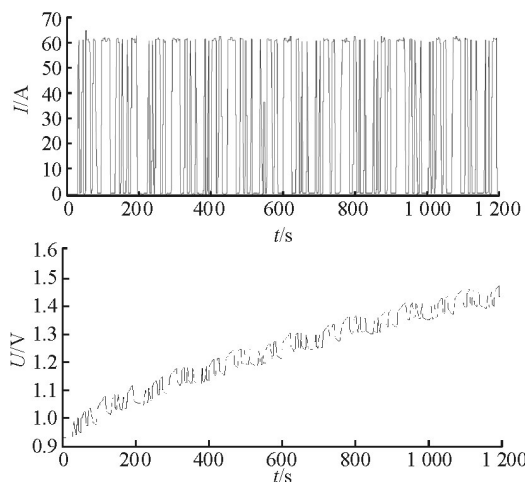


图6 小波滤波处理后充电实验波形

Fig. 6 Experiment waveforms of charging current after wavelet filtering

为针对以上2个实验的仿真结果的精度进行定量对比分析,分别计算各自的仿真输出误差均值可得,未经滤波处理的输出误差指标为: $E=0.0049$,而经小波滤波后得到的输出误差指标为: $E=0.0043$ 。通过二者误差指标的对比可知,采用小波滤波处理后的数据进行辨识可以提高参数辨识的精度。

此外,笔者还对其他若干实验数据进行小波滤波处理前后的辨识结果的精度对比,具体结果见表1。从表1可以看出,对于所有的实验数据,采用小波滤波处理后均能提高参数辨识的精度。

表1 滤波前后参数辨识精度对比

逆M序列电流等级/A	输出误差均值E	
	未滤波	小波滤波
0~90	0.006 0	0.005 7
0~120	0.006 8	0.006 2
0~150	0.006 7	0.005 9

5 结语

文中针对超级电容电气参数辨识实验设计的相关问题进行研究,通过对激励信号的选择、实验数据长度和采样周期的确定、数据预处理等方法问题的深入讨论并结合实验与仿真结果发现,基于文中的实验设计方法和数据滤波手段可以获得更准确的参数辨识结果,方法易于实现且具有很好的有效性,在实际应用中具有非常好的应用推广价值。

参考文献:

[1] EVANS A,STREZOV V, EVANS T J. Assessment of utility energy storage options for increased renewable energy penetration[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(6): 4141-4147.

[2] 黄先进,郝瑞祥,张立伟,等. 超级电容压缩空气混合储能应用于光伏发电系统的EMR建模与控制[J]. 高压电器, 2015, 51(6): 53-61.

HUANG Xianjin, HAO Ruixiang, ZHANG Liwei, et al. EMR modeling and control for a hybrid energy storage based on super-capacitor and compressed air used in PV system[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6): 53-61.

[3] 李欣然,徐婷婷,谭绍杰,等. 超级电容储能系统动态综合等效模型[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(4): 783-792.

LI Xinran, XU Tingting, TAN Shaojie, et al. Integrated dynamic equivalent model of super capacitor energy storage system[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(4): 783-792.

[4] 程志江,李永东,谢永流,等. 带超级电容的光伏发电微网系统混合储能控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2739-2745.

CHENG Zhijiang, LI Yongdong, XIE Yongliu, et al. Control strategy for hybrid energy storage of photovoltaic generation microgrid system with super capacitor[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2739-2745.

[5] LUO X, WANG J, DOONER M, et al. Overview of current

development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation[J]. Applied Energy, 2015(137): 511-536.

[6] AKINYELE D O, RAYUDU R K. Review of energy storage technologies for sustainable power networks[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2014(8): 74-91.

[7] 沈晓彦,黄钟琪,周建新,等. 锂电池在风光发电储能系统中的应用分析[J]. 电源技术, 2011, 35(5): 602-604.

SHEN Xiaoyan, HUANG Zhongqi, ZHOU Jianxin, et al. Application of li-ion battery in wind power and photovoltaic power generation system[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2011, 35(5): 602-604.

[8] 李少林,姚国兴. 风光互补发电蓄电池超级电容混合储能研究[J]. 电力电子技术, 2010, 44(2): 12-14.

LI Shaolin, YAO Guoxing. Research on ultracapacitor/battery energy storage in wind/solar power system[J]. Power Electronics, 2010, 44(2): 12-14.

[9] 张慧妍,程楠,景阳. 超级电容器储能系统的应用研究综述[J]. 电力电子技术, 2011, 45(12): 51-53.

ZHANG Huiyan, CHENG Nan, JING Yang. A review of super capacitor energy storage system application research[J]. Power Electronics, 2011, 45(12): 51-53.

[10] MELLER M, MENZEL J, FIC K, et al. Electrochemical capacitors as attractive power sources[J]. Solid State Ionics, 2014(265): 61-67.

[11] 王利猛,乔黎明,刘久成. 应用超级电容提高风电机组故障穿越能力研究[J]. 电测与仪表, 2015, 52(24): 35-39.

WANG Limeng, QIAO Liming, LIU Jiucheng. Research on super capacitor for improving ability of FRT of wind turbine[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(24): 35-39.

[12] 孙家南,赵洋,韦莉,等. 基于系统辨识的电化学超级电容器建模[J]. 高压电器, 2012, 48(9): 16-21.

SUN Jianan, ZHAO Yang, WEI Li, et al. Modeling of electrochemical supercapacitor based on system identification [J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(9): 16-21.

[13] 赵亮,刘炜,李群湛. 城市轨道交通超级电容储能系统的EMR建模与仿真[J]. 电源技术, 2016, 40(1): 124-127.

ZHAO Liang, LIU Wei, LI Qunzhan. Study of supercapacitor energy storage system for urban railway transit using energetic macroscopic representation[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2016, 40(1): 124-127.

[14] 于鹏,井天军,杨仁刚. 超级电容动态容值测量与容值函数参数估计[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 169-174.

YU Peng, JING Tianjun, YANG Rengang. Capacitance measurement and parameter estimation method for supercapacitors with variable capacitance[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(3): 169-174.

- [14] 胡庆生. 现代电气工程实用技术手册[M]. 北京:机械工业出版社, 1994.
HU Qingsheng. Modern electrical engineering practical technical manuals[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1994.
- [15] 中国电能成套设备公司, 中国电力科学研究院. 1989~1997年全国电力系统 220 kV 及以上 SF₆ 开关设备运行情况调查[R]. 北京:中国电力科学研究院, 1998.
China Power Complete Equipment Co., Ltd., China Electric Power Research Institute. From 1989 to 1997 the national power system, 220 kV and above SF₆ switchgear equipment running status survey[R]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 1998.
- [16] 闻邦椿. 机械设计手册[M]. 北京:机械工业出版社, 1994.
WEN Bangchun. Mechanical design manual[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1994.
- [17] 高国英, 张和顺, 郭江文. GIS 隔离开关, 接地开关机构的模拟负载试验装置[J]. 高压电器, 2011, 47(1): 100-102.
GAO Guoying, ZHANG Heshun, GUO Jiangwen. Simulating test device for the mechanism for GIS disconnecting switches or earthing switches[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(1): 100-102.
- [18] 尹 康, 陈保伦, 苟 轲, 等. 液压弹簧机构储能回路的故障诊断与处理[J]. 高压电器, 2015, 51(4): 188-193.
YIN Kang, CHEN Baolun, GOU Ke, et al. Hydraulic spring energy storage circuit fault diagnosis and processing[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(4): 188-193.
- [19] 陈保伦. HMB-4 型液压弹簧机构的特点、操作使用及故障处理[J]. 电气制造, 2009(5): 66-69.
CHEN Baolun. HMB-4 type hydraulic spring mechanism characteristics, operation and troubleshooting[J]. Electrical Manufacturing, 2009(5): 66-69.
- [20] 杨景刚, 刘 媛, 高 山, 等. 高压断路器机械故障诊断技术[J]. 江苏电机工程, 2016(2): 1-6.
YANG Jinggang, LIU Yuan, GAO Shan, et al. High voltage circuit breaker mechanical fault diagnosis technology[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016(2): 1-6.

王 静(1986—), 女, 工程师, 硕士研究生, 主要从事变电设备技术监督工作。

(上接第 217 页)

- [15] 王红梅. 混合动力挖掘机用超级电容的建模与参数辨识[J]. 电源技术, 2014, 38(8): 1504-1506.
WANG Hongmei. Modeling and parameter identification of ultracapacitor for hybrid excavator[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2014, 38(8): 1504-1506.
- [16] 赵 洋, 韦 莉, 张逸成, 等. 基于粒子群优化的超级电容器模型结构与参数辨识[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(15): 155-161.
ZHAO Yang, WEI Li, ZHANG Yicheng, et al. Structure and parameter identification of supercapacitors based on particle swarm optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(15): 155-161.
- [17] 王志贤. 最优状态估计与系统辨识[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2004.
WANG Zhixian. Optimal state estimation and system identification[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2004.
- [18] 方崇智, 萧德云. 过程辨识[M]. 北京:清华大学出版社, 1988.
FANG Chongzhi, XIAO Deyun. Process identification[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988.
- [19] ZHANG X, MI C C, MASRUR A, et al. Wavelet-transform-based power management of hybrid vehicles with multiple on-board energy sources including fuel cell, battery and ultracapacitor[J]. Journal of Power Sources, 2008, 185(2): 1533-1543.
- [20] 张德丰. MATLAB 小波分析[M]. 北京:机械工业出版社, 2009.
ZHANG Defeng. Wavelet analysis based on MATLAB[M]. Beijing: China Machine Press, 2009.

赵 洋(1981—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为新能源发电技术与应用、超级电容储能系统性能分析、系统辨识与智能优化算法。